

**РЕГУЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ
ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І
НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ**

Встановлені закономірності регулювання магнітного поля при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб. Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмовідводом і регулюванням магнітного поля зварювального струму шляхом пропускання струму попереду і позаду дуги у співвідношенні $I_1/I_2 = 1,7-1,9$, що запобігає магнітне дуття, забезпечує рівновагу дуги, стабільність процесу, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключові слова: магнітне дуття, електромагнітна сила, регулювання магнітного поля зварювального струму, здрібнення мікроструктури, ударна в'язкість зварних з'єднань, одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

Щетинин С.В., Никитенко П.В., Элсаед Халед. Регулирование магнитного поля при односторонней высокоскоростной сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей. Установлены закономерности регулирования магнитного поля при односторонней высокоскоростной сварке труб. Разработан способ односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей с двусторонним токоотводом и регулированием магнитного поля сварочного тока путем пропускания тока впереди и сзади дуги в соотношении $I_1/I_2 = 1,7-1,9$, что предотвращает магнитное дутье, обеспечивает равновесие дуги, стабильность процесса, повышения качества и ударной вязкости сварных соединений.

Ключевые слова: магнитное дутье, электромагнитная сила, регулирование магнитного поля сварочного тока, измельчение микроструктуры, ударная вязкость сварных соединений, односторонняя высокоскоростная сварка труб для газо- и нефтепроводных магистралей.

S.V. Shchetinin, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled. Welding current magnetic field regulation at high-speed one-sided welding of the pipes for gas and oil pipelines. One-sided high-speed pipe welding for gas and oil pipelines is an energy and material saving process, the use of which is restricted by the magnetic blow and the violation of the external and internal welds formation. Therefore, the development of the one-sided high-speed pipe welding for gas and oil pipelines process, which ensures the magnetic blow prevention, stability, improving the welded joints quality and toughness, is an important scientific and technical problem. According to the magnetism quantum theory, any system with the help of radiation or another method always comes to the lowest or principal state, with an eigen value of energy equal to E_0 . It has been established that the magnetic blow is the result of the minimum energy law, according to which the arc deviates to the side of a lower magnetic field until the break, as a result of which the process stability and the welds formation quality are violated. When welding pipes for gas and oil pipelines, the magnetic blow increases significantly due to of the magnetic field lines concentration in the ferromagnetic pipe with high magnetic permeability, which results in increased magnetic blow and the violation of both the process stability and the welds formation. To prevent the magnetic blow, welding pipes with two-sided current supply

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

and regulating the welding current magnetic field process by passing current in front and behind the arc has been developed, which ensures the arc equilibrium, reducing the magnetic field energy to zero, stability and improving of the welded joints quality. One-sided high-speed welding pipes for gas and oil pipelines method with two-sided current supply and the welding current magnetic field regulation by transmitting current behind and in front of the arc in a ratio $I_1/I_2 = 1,7-1,9$, that ensures the magnetic blow prevention, arc balance, process stability, fine-grained microstructure, the welded joints quality and impact strength improving has been developed.

Keywords: *magnetic blow, electromagnetic force, welding current magnetic field regulation, fine-grained microstructure, welded joints impact strength, one-sided high-speed pipe welding for gas and oil pipelines.*

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей є енерго- і матеріалозберігаючим процесом, використання якого обмежено магнітним дуттям і порушенням формування зовнішнього і внутрішнього валиків. Тому розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який запезпечує запобігання магнітного дуття, стабільність, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Магнітне поле зварювального струму в значній мірі визначає стабільність процесу і формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей. Магнітне поле на високому науковому рівні вивчено Р.М. Уайтом, яким встановлено квантову теорію магнетизму [1], згідно якої будь-яка система за допомогою випромінювання або іншого способу завжди приходить в найнижчий або основний стан, з власним значенням енергії, рівним E_0 . Магнітне дуття – результат закону мінімуму енергії, який підтверджує квантова теорія магнетизму. Особливо посилюється магнітне дуття при зварюванні труб [2-6] внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феромагнітній трубі, підвищення магнітного поля зварювального струму в трубі, порушення стабільності процесу і формування швів. Магнітне поле використовується для електромагнітного перемішування рідкого металу і підвищення якості зварних швів [7-9]. Посилення магнітного дуття при зварюванні труб загальновідомо, однак магнітне поле при зварюванні труб досліджено недостатньо.

Мета статті – вивчення природи магнітного дуття і розробка способу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей з регулюванням магнітного поля зварювального струму, що запобігає магнітне дуття, забезпечує стабільність процесу, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Виклад основного матеріалу. Магнітне поле зварювального струму складається з поля зварювальної дуги і магнітного поля струму, що тече по трубі. Напрямок магнітних полів співпадає, тому індукція магнітного поля зварювального струму є сумою індукцій магнітного поля дуги B_d та індукції поля струму, що тече по трубі B_T :

$$B = B_d + B_T, T.$$

Магнітне поле дуги створює пінч-ефект, який призводить до зменшення діаметру і стабілізує дугу. Згідно закону мінімуму енергії магнітне поле струму, що тече по трубі, під дією електромагнітної сили призводить до відхилення дуги в сторону меншого магнітного поля і магнітному дуттю.

Величина діючої на дугу електромагнітної сили F прямо пропорційна величині струму I , індукції магнітного поля B і довжині дуги L :

$$F = IBL.$$

В умовах виробництва труб для газо- і нафтопровідних магістралей встановлено, що при зварюванні труб від струмопідводу під дією електромагнітної сили магнітного поля зварювального струму внаслідок закону мінімуму енергії дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля до обриву, дугу неможливо закрити флюсом, стабільність і формування швів порушується. При цьому напруга зростає, струм падає. Електрод подається, закорочує на трубу і дуга заново збуджується. При закорочуванні на трубу струм зростає, напруга знижується. Процес періодично повторюється. В результаті зміни режиму порушується формування швів, яке становиться нерівномірним по ширині та глибині проплавлення.

Для запобігання магнітного дуття, рівноваги дуги, зниження енергії, підвищення стабільності процесу, формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань розроблено спосіб зварювання труб з двостороннім струмовідводом, при якому електромагнітне поле регулюється за рахунок зміни величини струму, що тече попереду і позаду дуги (рис. 1). Перерозподіл струму, що тече попереду і позаду дуги, та регулювання магнітного поля зварювального струму проводили шляхом зміни перетину зварювальних кабелів в начало і кінець труби.

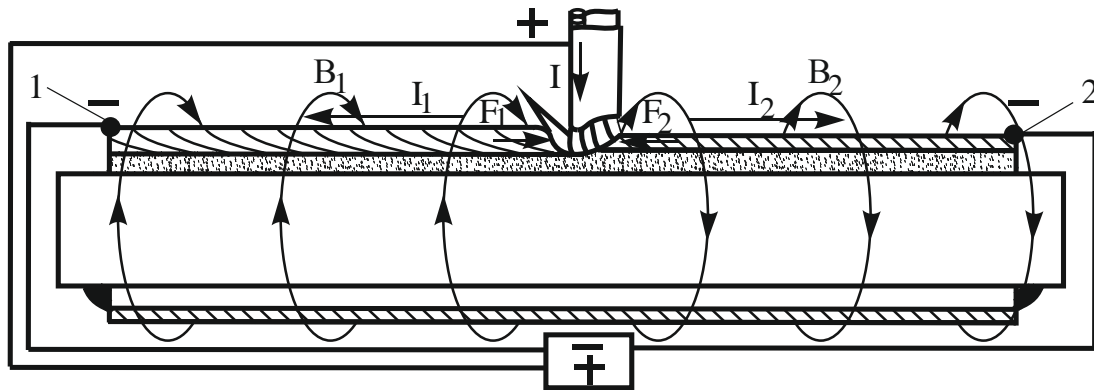


Рис. 1 – Одностороннє високошвидкісне зварювання труб з регулюванням магнітного поля зварювального струму за рахунок пропущення струму попереду і позаду дуги: 1, 2 – точки струмовідводу; I – зварювальний струм; I_1 – струм на початок труби; I_2 – струм в кінець труби; B_1 – індукція магнітного поля позаду дуги; B_2 – індукція магнітного поля попереду дуги; F_1 – електромагнітна сила, що відхиляє дугу вперед відносно напрямку зварювання; F_2 – електромагнітна сила, що відхиляє дугу назад відносно напрямку зварювання

В результаті проведених досліджень впливу розподілу струму по трубі на стабільність процесу і формування швів встановлено, що оптимальним є співвідношення струмів позаду і попереду дуги $I_1/I_2 = 1,7-1,9$, при якому електромагнітне поле зварювального контуру забезпечує стабільність процесу, рівномірне і якісне формування зовнішнього і внутрішнього валиків.

При зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей труба розташовується на феромагнітній штанзі, яка виконує роль несучої конструкції з флюсовою подушкою і посилює магнітне поле зварювального струму.

Вивчення впливу розподілу струму, що протікає в початок і кінець труби, на індукцію магнітного поля попереду і позаду дуги показало, що вона пропорційна струму далеко від дуги. По мірі наближення дуги індукція попереду зростає, а по мірі віддалення індукція позаду дуги зменшується (рис. 2). Вимірювання індукції проводили тесламетром EM4305 в зазорі труби при зварюванні труб діаметром 0,426 м з товщиною стінки 0,008 м. Експериментальні дані індукції магнітного поля, отримані в реальних умовах зварювання труб, добре узгоджуються з даними, отриманими при моделюванні процесу. Це підтверджує адекватність моделі реальним умовам зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей. На мінімально досліджуваній відстані 0,25 м індукція магнітного поля дуги $B = 168 \cdot 10^{-5}$ Т. Тому встановлена зміна індукції, цілком ймовірно, є наслідком різного розташування ліній струму щодо стику.

Магнітне поле позаду дуги зменшується при утворенні зварного шва і його охолодженні за рахунок збільшення кількості силових ліній, що проходять по металу шва. Вимірювання індукції позаду дуги виробляли на початку труби, тому високі значення є підтвердженням асиметричності поля в області, віддаленій від середини стику. Магнітні силові лінії прагнуть замкнутися через метал, тому вони згущуються позаду дуги, збільшуючи індукцію поля на початку труби.

Магнітне поле попереду дуги має протилежний напрям внаслідок протилежного напрямку струму, який тече в кінець труби.

Індукція магнітного поля зварювального струму позаду дуги на відстані від дуги 0,9 м і індукція попереду дуги на відстані 0,25 м має однакове значення 0,1 Т і -0,1 Т, що забезпечує

взаємне знищення магнітних полів протилежного напрямку; значення індукції, що дорівнює нулю $B = 0,1 - 0,1 = 0$, забезпечує рівновагу дуги, стабільність процесу і підвищення якості формування і ударної в'язкості зварних з'єднань.

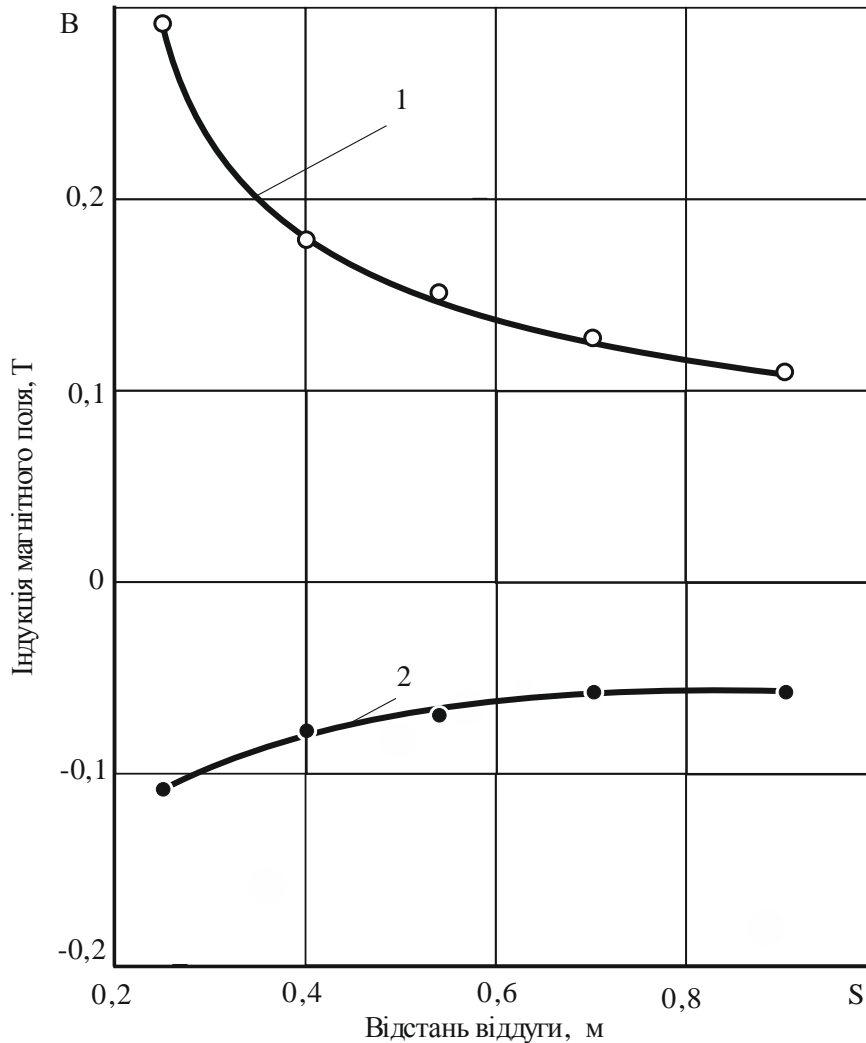


Рис. 2 – Магнітне поле зварювального струму при зварюванні труб діаметром 0,426 м з товщиною стінки 0,008 м: 1 – позаду дуги; 2 – попереду дуги

Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей проводиться складовим електродом, що забезпечує якісне формування внутрішнього валику на флюсовій подушці зі стандартним склоподібним флюсом, якісне формування і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань. При високошвидкісному зварюванні дуга відхиляється назад, тому для нахилу дуги вперед струм позаду дуги пропускають більше ніж попереду. Згідно закону мінімуму енергії дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля вперед, що забезпечує формування швів без підрізів. При високошвидкісному зварюванні пропорційно зростає швидкість кристалізації рідкого металу та навколошовної зони, внаслідок чого здрібнюється мікроструктура і підвищується ударна в'язкість зварних з'єднань.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей на режимі: величина зварювального струму – $I = 2000-2100$ А, напруга на дузі – $U = 27-29$ В, швидкість зварювання – $V = 75$ м/ч, величина струму позаду дуги – $I_1 = 1300-1400$ А, попереду дуги – $I_2 = 700$ А. Дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля вперед, що забезпечує стабільність процесу, якісне формування зовнішніх швів без підрізів, рівномірне формування зворотного валику на флюсовій подушці та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Розроблений спосіб запобігання магнітного дуття з двостороннім струмопідводом і встановлені закономірності регулювання магнітного поля зварювального струму можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні котлів залізничних цистерн.

Подальші дослідження в данному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечить підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, зниження енергоємності та матеріаломісткості процесу.

Висновки

1. Магнітне дуття – результат закону мінімуму енергії, відповідно якого дуга відхиляється під дією електромагнітної сили в сторону меншого магнітного поля до обриву, в результаті чого порушується стабільність процесу і якість формування зварних швів.

2. При зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей магнітне дуття значно збільшується внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в феромагнітній трубі з великою магнітною проникністю, що призводить до зростання магнітного дуття, порушення стабільності процесу і формування зварних швів.

3. Для запобігання магнітного дуття розроблено процес зварювання труб з двостороннім струмовідводом і регулюванням магнітного поля зварювального струму за рахунок пропущення струму попереду і позаду дуги, що забезпечує рівновагу дуги, зниження енергії магнітного поля до нуля, стабільність і підвищення якості зварних швів.

4. Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмовідводом і регулюванням магнітного поля зварювального струму шляхом пропущення струму попереду і позаду дуги у співвідношенні $I_1/I_2 = 1,7-1,9$, що запобігає магнітне дуття, забезпечує рівновагу дуги, стабільність процесу, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Перелік використаних джерел:

1. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М. Уайт. – М. : Мир, 1972. – 306 с.
2. Корольков П.М. Природа возникновения и методы устранения магнитного дутья при сварке / П.М. Корольков // Сварочное производство. – 1998. – № 5. – С. 6-8.
3. Blakeley P.J. Magnetic arc blowcanses, effects and cures / P.J. Blakeley // Metal Construction. – 1988. – № 2. – Vol. 20. – Pp. 10-13.
4. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields / E.W.D. Norman // Metal Construction. – 1984. – № 7. – Vol. 16. – Pp. 441-445.
5. Blakeley P.J. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding / P.J. Blakeley, A. Sanderson // Welding Journal. – 1984. – № 1.– Pp. 42-49.
6. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 2. Effects and solutions / E.W.D. Norman // Metal Construction. – 1984. – № 8. – Vol. 16. – Pp. 496-500.
7. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брисман, Г.М. Шеленков. – К. : Техника, 1983. – 127 с.
8. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К. : Екотехнологія, 2010. – 288 с.
9. Черныш В.П. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энерговыделения встык при дуговой сварке / В.П. Черныш, Р.Н. Рыжов // Автоматическая сварка. – 1998. – № 5. – С. 49-51.

References:

1. White R.M. *Kvantovaiia teoriia magnetizma* [The Quantum Theory of Magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1972. 306 p. (Rus.)
2. Korolkov P.M. *Priroda vozniknoveniia i metody ustraneniia magnitnogo dut'ia pri svarke* [The nature of occurrence and methods for eliminating magnetic blast during welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1998, no. 5, pp. 6-8. (Rus.)
3. Blakeley P.J. Magnetic arc blowcanses, effects and cures. *Metal Construction*, 1988, no. 2, vol. 20, pp. 10-13.
4. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields. *Metal Construction*,

- 1984, no. 7, vol. 16, pp. 441-445.
5. Blakeley P.J., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding. *Welding Journal*, 1984, no. 1, pp. 42-49.
 6. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 2. Effects and solutions. *Metal Construction*, 1984, no. 8, vol. 16, pp. 496-500.
 7. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briskman A.N., Shelenkov G.M. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Welding with electromagnetic stirring]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983. 127 p. (Rus.)
 8. Rizhov R.M., Kuznetsov V.D. *Magnitne keruvannia iakistiu zvarnikh z 'ednan'* [Magnetic quality control of welded joints]. Kiev, Ekotehnologiya Publ., 2010. 288 p. (Ukr.)
 9. Chernysh V.P., Ryzhov R.N. Zavisimost' parametrov upravliaiushchego magnitnogo vozdeistviia ot energovlozheniia vstyk pri dugovoi svarke [Dependence of the parameters of the controlling magnetic effect on the butt-in energy input during arc welding]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 1998, no. 5, pp. 49-51. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Статья надійшла 15.08.2019

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201055

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Коваль О.В.³

ПІДВИШЕННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ВАЛКІВ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ І ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ

Встановлено закономірності впливу товщини наплавленого металу і погонної енергії на зварювальні напруги і тріщиностійкість валків. Зі зростанням товщини наплавленого металу та погонної енергії зварювальні напруги підвищуються, що приводить до утворення холодних тріщин і відшаровування наплавленого металу. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує зниження зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, попередження утворення тріщин, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Ключові слова: зварювальні напруги, погонна енергія, товщина наплавленого металу, горячи та холодні тріщини, відшаровування наплавленого металу, тріщиностійкість, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.

Щетинин С.В., Щетинина В.И., Коваль А.В. Повышение трещиностойкости валков путем снижения сварочных напряжений и погонной энергии. Установлены закономерности влияния толщины наплавленного металла и погонной энергии на сварочные напряжения и трещиностойкость валков. С ростом толщины наплавленного металла и погонной энергии сварочные напряжения повышаются, что приводит к образованию холодных трещин и отслаиванию наплавленного металла. Разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение сварочных напряжений, измельчение микроструктуры, предупреждение образования трещин, повышение трещиностойкости и износостойкости валков.

Ключевые слова: сварочные напряжения, погонная энергия, толщина наплавленного металла, горячие и холодные трещины, отслоение наплавленного металла.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь